



SELECCIONES MATEMÁTICAS

Universidad Nacional de Trujillo

ISSN: 2411-1783 (Online)

Vol. 02(02): 104 - 114 (2015)



Scheduling con incertidumbre.

Scheduling with Uncertainty.

Edwar Luján Segura ^{*}, Flabio Gutiérrez Segura [†], Edmundo Vergara Moreno[‡], and Rafael Asmat Uceda[§]

Received, Jun. 20, 2015

Accepted, Oct. 15, 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sel.mat.2015.02.04>

Resumen

En el mundo real, la incertidumbre es un factor importante a tener en cuenta pues, de lo contrario, los schedules corren el riesgo de volverse no factibles y/o inviables. Por tanto, en la creación de los schedules se debe considerar la incertidumbre para prevenir o reparar efectos no deseados. En este trabajo se realiza una revisión de scheduling bajo incertidumbre, con el objetivo de responder las siguientes preguntas: ¿Cómo podemos representar la incertidumbre? y ¿Qué métodos existen para tratar la incertidumbre? Asimismo, se muestran las diferentes formas de cómo se presenta la incertidumbre en áreas como la petroquímica, la producción, el transporte, la energía, etc. También se hace un estudio sobre las dos cuestiones que se deben responder en todo proceso de scheduling: ¿Cuándo Programar? y ¿Cómo Programar?.

Palabras clave. Incertidumbre, scheduling, scheduling difuso, scheduling estocástico.

Abstract

In real world, uncertainty is a important factor to take into account otherwise the schedules face the risk of failing, and/or to become unviable. Therefore, when creating schedules we must consider the uncertainty to prevent or repair the undesired effects. In this work we make a review of scheduling with uncertainty to respond the following questions: How can we represent the uncertainty? and What methods do exist to treat uncertainty? Likewise, we show the different ways in how the uncertainty is present in areas like the petrochemistry, the production, the transport, the energy, etc. We also make a study about two questions that all scheduling must respond: When to programme? and how to programme?

Keywords. Uncertainty, scheduling, fuzzy scheduling, stochastic scheduling.

1. Introducción. La incertidumbre es un tema de estudio en los diversos tipos de sistemas, debido a que siempre se producen cambios que alteran su comportamiento, en particular en los sistemas relacionados con problemas de scheduling, la incertidumbre en este tipo de problemas se puede presentar por ejemplo en: interrupciones o caídas de máquinas, cancelación de pedidos, etc., los cuales hacen que la programación de tareas sea más compleja. Con el fin de solucionar o al menos traten de mitigar los efectos producidos por estos cambios, se proponen diferentes métodos.

Los dos elementos clave de la programación son: la generación de schedules y la revisión del schedule [8,30]. La generación de schedules actúa como un mecanismo de predicción que determina la programación de los tiempos de inicio y de finalización de las tareas de producción en base a los requisitos y restricciones dadas antes del proceso de producción. La revisión de scheduling es una parte reactiva, que supervisa

^{*}Departamento de Informática, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo-Perú (elujans@unitru.edu.pe).

[†]Departamento Matemáticas de la Universidad Nacional de Piura, Piura-Perú (flabio@unp.edu.pe).

[‡]Departamento de Matemática de la Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo-Perú (evergara@unitru.edu.pe).

[§]Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo-Perú (rasmat@unitru.edu.pe).

This work is licensed under the [Creative Commons Attribution-NoComercial-ShareAlike 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

la ejecución de lo previsto y se ocupa de acontecimientos inesperados. Los enfoques de programación se pueden dividir en: scheduling On-line y scheduling Off-line, [16]. En el scheduling off-line, todos los trabajos disponibles se programan a la vez para todo el horizonte de planificación, mientras que para el scheduling On-line se toman decisiones en el momento en que se necesitan.

Para tratar la incertidumbre en los problemas de scheduling, se tiene dos enfoques, el scheduling reactivo y el scheduling proactivo. El scheduling reactivo es un proceso para modificar la programación inicial, con el fin de adaptar el cambio (incertidumbre) en el entorno de producción; cambios tales como, eventos de interrupción, llegadas de pedido apresurados, cancelaciones de pedidos o averías de máquinas. Para este tipo de incertidumbre no hay suficiente información previa a la realización de los parámetros inciertos, que permitirá una acción protectora. Por otro lado, el scheduling preventivo o proactivo, puede hacer frente a la incertidumbre de los parámetros, tales como, los tiempos de procesamiento, la demanda de los productos o los precios. Para este tipo de incertidumbre, se pueden utilizar las técnicas de datos históricos y/o de predicción, para obtener información a futuro sobre el comportamiento de parámetros inciertos en la forma de rango de parámetros o de distribuciones estocásticas. El scheduling preventivo sirve de base para la planificación de las actividades de apoyo, pues los compromisos se hacen con base en esta prevención. Dentro del scheduling preventivo distinguimos otros enfoques: scheduling estocástico, métodos de optimización robusta, métodos de programación difusa, análisis de sensibilidad y métodos de programación paramétrica.

Este trabajo toma como referencia principalmente los trabajos de Lei, Verderame, Sabuncuoglu y Zulkui, desarrollados en [19], [25], [33] y [40]. En "Scheduling bajo incertidumbre", se menciona el concepto, y la finalidad del scheduling así como la importancia de considerar la incertidumbre. En "Principales temas de scheduling", se tratan las cuestiones principales que todo proceso de scheduling debe responder: ¿Dónde programar? y ¿Cuándo programar?. En "Formas de incertidumbre", se muestra las diferentes formas de incertidumbre que se presentan en algunas áreas de la industria, la energía. En "Enfoques de scheduling", se presentan las técnicas para representar la incertidumbre. Finalmente en "Métodos para tratar la incertidumbre", se presentan los métodos encontrados en la literatura, que tratan la incertidumbre.

2. Material y Métodos .

2.1. Scheduling bajo incertidumbre. El scheduling o programación de tareas, consiste en la asignación de recursos limitados a determinadas tareas a ejecutarse durante un cierto período de tiempo. Los recursos y las tareas pueden tomar diferentes formas, de acuerdo al problema que se esté analizando. La meta final es optimizar uno o más objetivos.

Los sistemas están frecuentemente sujetos a algún tipo de incertidumbre, el cual puede alterar su proceso de trabajo (por ejemplo, fallas de máquinas, operadores no disponibles, cambios en la disponibilidad de datos, entre otros).

La incertidumbre es un tema muy importante en scheduling, ya que puede causar perturbaciones y desbaratar toda la programación realizada. Por ello es necesario saber o tratar de predecir dónde y cuándo se podría producir para poder tomar medidas y, de esa forma, prevenir o reparar los problemas que pueda ocasionar.

En la Tabla (2.2), se muestra los problemas de scheduling con incertidumbre presentes en diversos sectores de la industria, química, petroquímica y farmacéutica (CPPI), energía, transporte, entre otras. Se presenta los parámetros de cada sector donde se presenta la incertidumbre, así como las diversas formas de la incertidumbre, conocida o no conocida, acotada (bounded), difusa (Fuzzy Set) y probabilística con sus variantes de acuerdo a las distribución de probabilidad (conocida o no conocida, discreta o continua, normal, uniforme, logística, exponencial)

2.2. Cuando y como programar un problema de scheduling. En entornos de producción de naturaleza dinámica e incierta, se presentan retrasos, interrupciones inesperadas y eventos aleatorios que alteran el estado del sistema. En este contexto, surgen dos preguntas inmediatas: When to schedule? (¿Cuándo programar?) y How to schedule? (¿Cómo programar?)

A. Cuándo Programar

"Cuándo programar" tiene que ver con el tiempo de decisiones del scheduling y determina la respuesta del sistema a diversos tipos de efectos en el entorno. A medida que aumenta la frecuencia de programación, la capacidad de respuesta del sistema también aumenta.

Existen diversas alternativas para decidir sobre el momento de las decisiones de programación. La primera, llamada programación periódica, programa el sistema periódicamente. La duración del período puede ser constante o variable. El caso constante, se utiliza con mayor frecuencia en la práctica; las revisiones se realizan al comienzo de cada intervalo de tiempo fijo. Con el método de intervalo variable en el tiempo, las decisiones de programación se toman después de haberse realizado una parte de la programación [31].

Otra alternativa podría ser la revisión el schedule luego de un cierto número de eventos aleatorios. Por ejemplo, el programa puede actualizarse luego de cada avería de la máquina principal, o con cada nuevo trabajo importante. Este método de programación se denomina programación continua [27]. Otro método es la programación adaptativa [31], también llamada respuesta controlada. De acuerdo con esta política, se activa una decisión de scheduling al alcanzarse una cantidad pre-determinada de desviación del scheduling original. Por ejemplo, se hace una revisión cuando la diferencia total en los plazos de ejecución entre los schedules iniciales y realizados supera un cierto valor límite, digamos 30 minutos, o un porcentaje del makespan. Asimismo, los schedules pueden ser revisados después de alcanzarse una cierta cantidad de desviación en el rendimiento planeado, el tiempo de flujo, o la tardanza. Además, también pueden considerarse varios métodos híbridos. Por ejemplo, en [?] se propone una política de planificación, llamada programación orientada a eventos, donde las revisiones no sólo se realizan al final de cada intervalo de tiempo fijo (es decir, la programación periódica), sino también en respuesta a los acontecimientos importantes como el cambio de estado del sistema (es decir, la programación continua).

B. Cómo programar "Cómo programar" determina la forma en la cual se generan y actualizan los schedules (programas). Hay cuatro temas relacionados. El primero tiene que ver con el esquema o plan de Programación, el cual puede ser Off-line (fuera de línea), On-line (en línea), o una combinación de los dos (es decir, híbridos). El scheduling Off-line se refiere a la programación de todas las operaciones de trabajos disponibles para todo el período de programación, antes de ejecutar el programa; en el scheduling On-line, las decisiones se toman una a la vez, durante la ejecución del programa (ver [32]). Un buen ejemplo para la programación On-line es la aplicación de las reglas de secuenciación en un entorno dinámico. Entre estos dos extremos, otra alternativa podría ser el scheduling Quasi-line, en el que un subconjunto de las operaciones del conjunto de trabajos ya se ha programado y el resto se deja para períodos futuros [31, 38].

El enfoque On-line tiene capacidad para una considerable flexibilidad en el schedule, a fin de compensar las perturbaciones imprevistas del sistema, pero carece de la perspectiva global proporcionada por un enfoque Off-line. Por otro lado, se sabe que el scheduling off-line es superior al scheduling on-line en un entorno estático y determinista y es aún mejor en un entorno estático y dinámico. La diferencia entre los rendimientos de estos sistemas de scheduling no es tan grande como en el caso estático [32]. Se necesita un análisis más detallado de los métodos de scheduling off-line y on-line en un entorno dinámico y con incertidumbre.

La segunda cuestión es la cantidad de datos que se utilizan durante el proceso de generación de schedulings. En [17] se define el Horizonte de previsión (Forecasting Horizont, FH) como el lapso de tiempo de los datos de lanzamiento del trabajo. El FH representa el período de tiempo máximo durante el cual los schedulers (programadores) tienen suficiente información para generar un schedule. También se define la Ventana de Visión de Futuro (Look-ahead window, LW): la porción de FH para el cual se genera un nuevo horario o se hace una revisión. Esta ventana puede ser menor o igual que el FH; si es más pequeña que el FH, se utiliza sólo una parte de la información disponible. Esto se debe generalmente a la baja confianza en la exactitud de la información en un futuro a largo plazo. En este caso se utiliza cierta información del futuro a corto plazo. Si LW es igual a FH, se utiliza toda la información disponible y a esto se le denomina Full scheduling (programación completa). Cuando LW es menor que FH, se llama Partial scheduling (programación parcial). Hay que tener en cuenta que si la programación es completa, ésta se emplea con revisión periódica y si FH es igual a la longitud del periodo, esta política corresponde a no hacer nada (es decir, dejar solo al sistema para que éste se recupere de las interrupciones).

La tercera se refiere al Type of Response (Tipo de respuesta). Se identifican al menos dos casos: 1) El Rescheduling, o la reprogramación de las operaciones de todos los trabajos que quedan a partir de la interrupción y 2) Do Nothing (No hacer nada), en el cual no se toman medidas correctivas y se deja al sistema recuperarse por sí solo de los efectos negativos de las interrupciones. Entre estos dos extremos, se encuentra schedule repair (reparar los schedules).

La cuarta se refiere a Performance Metrics (Medidas de rendimiento), en donde el planificador debe decidir qué métrica de rendimiento usar. Con frecuencia se utilizan las medidas de rendimiento clásicas como el makespan, el flowtime y la tardanza. Otras medidas más elaboradas son la **Robustez** y la **Estabilidad**. Éstas se utilizan sobre todo en entornos en cuales que la incertidumbre es un problema importante.

En la práctica, un típico proceso de scheduling tiene la siguiente estructura: La generación un schedule **Inicial** que oriente las futuras actividades de planta. No obstante, las perturbaciones aleatorias, tales como las averías de la máquina, las cancelaciones de pedidos, cambios en los plazos de entrega, variaciones en los tiempos de procesamiento, etc., originan que este schedule tenga que

ser revisado en parte o en su totalidad para mantener así su factibilidad.

El schedule que se ejecuta realmente en la planta se llama schedule Realizado. Este schedule puede diferir sustancialmente del scheduling Inicial, dependiendo del nivel de perturbaciones y los cambios en el medio ambiente. Las medidas de rendimiento denominadas robustez y estabilidad están relacionadas con esta diferencia.

La robustez se refiere a la diferencia en términos del valor de la función objetivo, es decir, a la insensibilidad en el rendimiento de la programación ante a las interrupciones. Un programa cuyo rendimiento no se deteriora en demasía frente a las interrupciones es llamado **Robusto**. En general, el rendimiento de la programación realizada es la principal preocupación de los profesionales en vez del rendimiento previsto o estimado de la programación inicial. Esto se debe a que el primero refleja la realidad, mientras que el otro sólo es un curso previsto de acciones.

La estabilidad, por otro lado, se refiere a la diferencia entre los schedules iniciales y finales y ya no en sus rendimientos. Si la realización de un schedule no se desvía demasiado de la programación inicial luego de las interrupciones, éste es llamado **Estable**. Además, dado que un schedule también sirve como plan para otras actividades productivas, tales como la determinación de las fechas de entrega, el tiempo de lanzamiento, los requisitos para los recursos secundarios, tales como herramientas, accesorios, etc. [37], entonces, cualquier desviación del schedule inicial puede interrumpir los planes de tales actividades y aumentar el nerviosismo del sistema. Por lo tanto, la estabilidad es una métrica de rendimiento importante en la práctica.

Debido a que los estudios existentes insinúan que la robustez y la estabilidad son objetivos en conflicto (por ejemplo, [37]) la naturaleza del compromiso entre estos parámetros de rendimiento requiere mayor investigación.

2.3. Representación de la incertidumbre. En [19], se hace una clasificación de problemas de scheduling de acuerdo a la naturaleza del problema: scheduling determinista y scheduling incierto. El primero se refiere a que, tanto las restricciones como los parámetros, se conocen con certeza. En el segundo, las condiciones de procesamiento o parámetros no pueden determinarse con anticipación. Respecto a los problemas de scheduling inciertos, se clasifican de acuerdo a la forma o método de descripción o representación de la incertidumbre, en probabilísticos (estocásticos) y conjuntos difusos. En [40] se añade otra forma de representar la incertidumbre, llamada Forma Acotada. A continuación se describe cada una de ellas.

A. Acotada En muchos casos, no hay suficiente información para desarrollar una descripción exacta de la distribución de probabilidad que caracteriza a los parámetros inciertos, pero si se pueden obtener límites de error, en este caso, se utilizan intervalos matemáticos para la estimación de la incertidumbre. Este método no requiere información sobre el tipo de incertidumbre en los parámetros. Los parámetros inciertos se describen por un intervalo $\theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}]$ o $|\tilde{\theta} - \theta| \leq \varepsilon$, donde $\tilde{\theta}$ es el valor "verdadero", θ es el valor nominal, y $\varepsilon > 0$ es un nivel de incertidumbre dado. Este es el método típico y más fácil de aplicar para describir los parámetros inciertos. Los límites representan los rangos de todas las posibles realizaciones de éstos parámetros. Los límites superior e inferior, se pueden determinar con el análisis de los datos históricos; por ejemplo, las órdenes de los clientes y los indicadores del mercado.

B. Probabilística Esta es una forma común para el tratamiento de la incertidumbre cuando se dispone de la información sobre el comportamiento de ésta. Su aplicación requiere el uso de modelos probabilísticos para describir los parámetros inciertos. En el enfoque probabilístico, la incertidumbre se caracteriza por las probabilidades asociadas con cada evento. La probabilidad de un suceso puede interpretarse en términos de la frecuencia de ocurrencia de ese evento. Cuando se considera un mayor número de muestras o experimentos, la probabilidad de un evento se define como la relación entre el número de veces que el evento se produce y el número total de muestras o experimentos. La distribución de probabilidad de la variable X puede describirse de forma única mediante la distribución de probabilidad de la función $F(x)$, la cual se define por $F(x) = P(X \leq x), x \in R$. Si X es una variable aleatoria discreta y se alcanza el valor x_1, x_2, \dots con una probabilidad $P(X = x_i) = p(x_i)$, la función de distribución de probabilidad se expresa como $F(x) = P(X \leq x) = \sum_{(x_i \leq x)} p(x_i)$.

Si la función de distribución de probabilidad es continua, entonces X es una variable aleatoria continua, y si, además, $F(x)$ es absolutamente continua, entonces la función de probabilidad de densidad $f(x)$ puede definirse como $f(x) = dF(x)/dx$. En otras palabras, una función de densidad de probabilidad, $f(x)$, es una función arbitraria que determina la densidad de probabilidad en términos de la variable de entrada x como sigue: la probabilidad de que la variable aleatoria en cuestión se encuentre en el intervalo $[a, b]$ es la integral de la función $f(x)$ de a hasta b .

CUADRO 2.1
Sector, parámetros y formas de incertidumbre.

Sector	Parámetros	Forma de incertidumbre
CPPI (Chemical, Petrochemical, and Pharmaceutical Industries)	<ul style="list-style-type: none"> • Precios de Mercado • Tiempos de procesamiento • cantidad demandada y fechas de vencimiento • Capacidad de unidades • Cantidad de unidades • Tiempo de transportes y costos 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded • Known discrete • Known continuous • Fuzzy Set • Unknown
Planificación de energía	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad demandada • Precios de energía • Desarrollo tecnológico • Capacidad de expansión • Precio de combustible • Precios de equipos • Fluctuaciones en las operaciones • Mitigación de esfuerzos 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded • Known discrete • Known continuous • Fuzzy Set • Unknown
Planificación en sistemas de generación de poder	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda, precios • Previsión de carga • Ubicación de demanda • Costos de inversión • Costos de combustibles • Expansión de redes • Cortes de energía • Capacidad de deterioro • Costos de re-equipamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded • Known discrete • Known continuous • Fuzzy Set • Unknown
Planificación de Granjas	<ul style="list-style-type: none"> • Precio de la cosecha • Costos de actividad • Condiciones de tiempo • Ataque de plagas • Producción de cosechas 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded • Known discrete • Known continuous • Fuzzy Set • Unknown
Planificación forestal	<ul style="list-style-type: none"> • Precio de demanda • Productividad forestal • Dinámica forestal • Disturbios naturales • Eventos catastróficos • Cambios tecnológicos • Regulaciones del entorno 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded • Known discrete • Known continuous • Fuzzy Set • Unknown
Planificación de residuos	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de transporte • Costo de operaciones • Capacidad de eliminación de residuos • Carga de residuos 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded • Normal • Fuzzy Sets

CUADRO 2.2
Formas de Incertidumbre, tomado de [25].

Administración de fuentes de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Valores de indicadores básicos • Valores de los criterios y pesos 	<ul style="list-style-type: none"> • Discrete uniform • Continuous uniform • Continuous normal • Continuous logistic
Planificación de transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Demandas • Tiempo de Viaje y de servicio • Número de clientes a visitar • Tiempo de llegada • Flujo de mercancías • Productividad de vehículos 	<ul style="list-style-type: none"> • Continuous normal • Continuous logistic • Exponential • Uniform

La incertidumbre se modela utilizando ya sean distribuciones de probabilidad discretas o discretizando la función de distribución de probabilidad continua. Por ejemplo, incertidumbres tales como fallas en el equipo o fracaso de las operaciones de proceso, se describen generalmente con parámetros discretos.

- C. Conjuntos difusos** Los conjuntos difusos permiten el modelado de la incertidumbre en los casos en donde no se dispone de datos históricos (distribuciones probabilísticas). Los modelos resultantes de programación basados en conjuntos difusos tienen la ventaja de que no requieren el uso de esquemas complicados de integración, necesarios para los modelos probabilísticos continuos y de que, además, no necesitan un gran número de escenarios como en las representaciones de incertidumbre de probabilidad discreta (Balasubramanian y Grossmann [2]). En la teoría clásica de conjuntos se define la función de pertenencia como:

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Por otro lado, en la teoría difusa cada elemento del conjunto tiene un grado de pertenencia $\mu_A(x)$ entre 0 y 1.

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \\ p; 0 < p < 1 & \text{si } x \text{ pertenece parcialmente a } A \end{cases}$$

En vez de distribuciones de probabilidad, estas cantidades hacen uso de funciones de pertenencia, basadas en la teoría de la posibilidad. Un conjunto difuso es una función que mide el grado de pertenencia a un conjunto. Un alto valor de estas funciones de pertenencia implica una alta posibilidad, mientras que un valor bajo implica una baja posibilidad.

2.4. Enfoques de scheduling. En un entorno de programación, es deseable que los schedules realizados tengan un alto rendimiento del sistema y que no se desvíen significativamente de los schedules iniciales. Para lograr estos objetivos y hacer frente a la incertidumbre, en los procesos de scheduling se consideran los siguientes enfoques: scheduling reactivo, scheduling proactivo y la combinación de ambos.

Partiremos del scheduling clásico para explicar cómo operan estos nuevos enfoques. En el scheduling clásico tenemos datos deterministas, es decir no consideramos la incertidumbre, y tampoco se consideran las interrupciones que se presentan durante las operaciones, por ello, el scheduling realizado es erróneo cuando se presentan dichas interrupciones.

En la Figura (2.1) se aprecia cómo, al inicio, se crea el algoritmo de scheduling. Con el paso del tiempo se van presentando las interrupciones y el scheduling no reacciona frente a ellas.

- A. Scheduling reactivo.** No considera directamente la incertidumbre al inicio de la generación del schedule, pero revisa el schedule cuando ocurren los eventos inesperados o las interrupciones. En otras palabras, el scheduling reactivo tiene por objeto encontrar las formas (ideales) a reaccionar de manera óptima frente a las interrupciones luego de que éstas ocurran. La reacción por lo general, se basa en la modificación de la planificación inicial existente (reparación), o la generación de un nuevo schedule a partir de cero (reprogramación). En la figura 2.2 se muestra cómo actúa en una línea de tiempo.

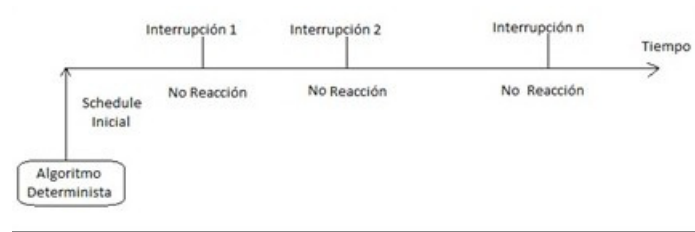


FIGURA 2.1. Scheduling Clásico, tomado de [25].

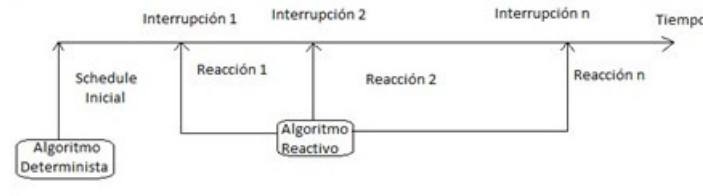


FIGURA 2.2. Scheduling Reactivo, tomado de [25].

- B. Scheduling Proactivo.** Considera futuras interrupciones al generar schedules iniciales. Se refiere a la generación de un schedule inicial que minimiza los efectos de las perturbaciones sobre las medidas de rendimiento (ver figura 2.3). Las interrupciones ya han sido consideradas al inicio por ello, frente a ellas, el sistema actúa automáticamente.
- C. Combinación de Scheduling Proactivo y Reactivo.** El scheduling proactivo y reactivo se pueden combinar de la siguiente manera: el scheduling inicial se programa de forma proactiva y luego las interrupciones se manejan de una manera reactiva. Ver figura 2.4 para el funcionamiento de dicha política.

2.5. Métodos para tratar la incertidumbre.

- A. Scheduling Reactivo** En el ámbito de la investigación operativa, gran parte de los métodos existentes sobre scheduling reactivos se caracterizan por estrategias de compromiso mínimo tales como despachos en tiempo real, los cuales crean schedules parciales basados en información local. Una extensión de este tipo enfoque permite al sistema seleccionar reglas de despacho en forma dinámica a medida que cambia el estado del Shop (tienda). Otra extensión se basa en un número de agentes inteligentes e independientes que tratan de optimizar su propia función objetivo [1].

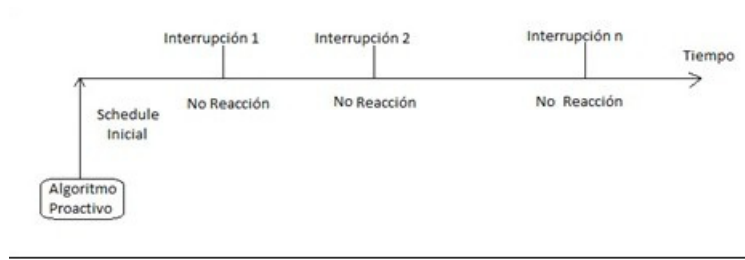
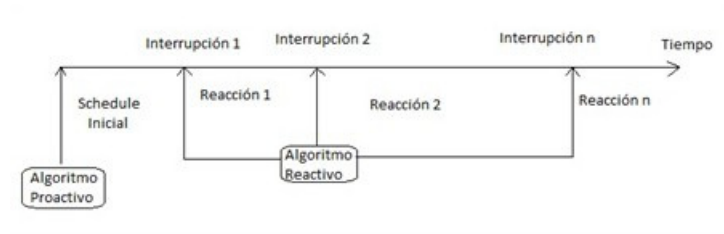
Los enfoques existentes en la literatura para abordar el problema de scheduling reactivo tratan con los siguientes tipos de perturbaciones: (a) Avería de máquina o cambios en la operación de la misma que afecten los tiempos de procesamiento de las tareas en estas unidades; (b) Orden de cambio para la modificación o cancelación de la demanda de productos y fechas de vencimiento.

El propósito de los enfoques propuestos es actualizar el programa de producción actual con el fin de proporcionar una respuesta inmediata al evento inesperado. El schedule original se obtiene de una manera determinista y las correcciones de programación reactiva se realizan ya sea durante o justo antes de la ejecución de las operaciones programadas. La actividad de planificación reactiva es de por sí un problema de programación a corto plazo con algunas características adicionales, principalmente con la posibilidad de que todas las fechas de vencimiento no puedan cumplirse.

Las acciones de la programación reactiva se basan en varias estrategias subyacentes, tanto en técnicas muy sencillas encaminadas a una rápida restauración de la consistencia del schedule, como, en una programación completa de las tareas a ser ejecutadas después de ocurrido el evento inesperado. Este enfoque se denomina rescheduling (reprogramación) y se puede usar cualquier medida de rendimiento determinista, tal como el makespan del nuevo proyecto.

Un gran número de las técnicas presentadas en la literatura resuelven el problema de scheduling reactivo a través de enfoques de programación matemática basándose, sobre todo, en programación Lineal Entera Mixta (iniciales en inglés, MILP) y la aplicación de reglas heurísticas. En [28] se consideran tiempos de procesamiento inciertos y se propone una técnica de scheduling reactivo basado en un modelo MILP orientado a lotes y modificada de acuerdo con la formulación STN de tiempo discreto propuesto por Kondil et al [18].

- B. Scheduling estocástico** La programación estocástica es el método más utilizado en la literatura en lo referente a programación preventiva. Aquí, el modelo original es un scheduling determinista que

FIGURA 2.3. *Scheduling Proactivo*, tomado de [25].FIGURA 2.4. *Scheduling Reactivo - Proactivo*, tomado de [25].

se transforma en un modelo estocástico para el tratamiento de la incertidumbre en función de variables estocásticas. En este tipo de enfoque, o bien se utilizan distribuciones de probabilidad discreta o bien se realiza una discretización de las funciones de distribución de probabilidad continua. La expectativa de un cierto criterio de desempeño, tal como el makespan esperado, se optimiza con respecto a las variables de decisión de la programación. Los modelos de programación estocástica se dividen en las siguientes categorías: Programación estocástica de dos etapas o programación estocástica multi etapa y enfoque de programación con restricciones de oportunidad.

En la programación estocástica de dos etapas se deben decidir las variables de la primera etapa antes de la actual realización de los parámetros inciertos. Puede realizarse una decisión en la segunda etapa para compensar los efectos negativos que pudieran haber surgido como resultado de la realización de los parámetros inciertos. La política óptima de tal modelo es una política única proveniente de la primera etapa y una colección de decisiones de recurso (reglas de decisión) la cual define que se deben tomar medidas en la segunda fase en respuesta a cada resultado aleatorio. Utilizando la misma idea, la programación estocástica de dos etapas se extiende también al enfoque multi-etapa. En [14] Ierapetrinou et al, abordaron el scheduling de plantas continuas multi-producto de etapa simple y de etapas múltiples para una sola línea de producción. En cada etapa se considera la incertidumbre en las demandas de los productos. Se utilizó la integración de cuadratura de Gauss para evaluar el beneficio esperado y se formularon modelos MILP para el problema de programación estocástica. En [7] Bonfill et al, utilizaron un enfoque de optimización estocástica para gestionar el riesgo en la programación a corto plazo de multi-productos en plantas dosificadoras con demanda incierta. El problema se modela utilizando un enfoque de optimización estocástica de dos etapas que representa la maximización de la utilidad esperada. La gestión del riesgo se aborda mediante la adición de una medida de control como un nuevo objetivo a tener en cuenta, lo que conduce a formulaciones de optimización multi-objetivo. En [6], los autores abordaron el problema de programación a corto plazo en procesos por lotes químicos junto con tiempos de procesamiento de variables, para identificar los horarios robustos capaces de enfrentar los principales efectos de conducir la operación de estos procesos con tiempos inciertos, es decir, inactivo, así como los tiempos de espera.

El enfoque sobre restricciones de oportunidad, se concentra en la fiabilidad del sistema, es decir, en la capacidad del sistema para satisfacer la viabilidad en un entorno incierto. La fiabilidad se expresa como un requisito mínimo en la probabilidad de limitaciones satisfactorias. En [23], se propuso un modelo de programación matemática para la programación óptima de las operaciones de una planta química de procesamiento por lotes. Se consideran tiempos de procesamiento inciertos en procesos por lotes y se emplean restricciones de oportunidad para dar cuenta de los riesgos de violación de las restricciones temporales en determinadas condiciones, tales como funciones de distribución uniforme. En [24], se aborda la planificación y la programación de varios períodos en plantas multi-producto bajo incertidumbre de la demanda. El modelo estocástico propuesto es

una extensión del modelo determinista introducido en [5]. Los elementos estocásticos del modelo se expresan en forma determinista, equivalente a las limitaciones de aleatoriedad y, eliminando la necesidad de técnicas de discretización o de muestreo.

Aparte de los dos métodos anteriores para el modelado de la programación con incertidumbre utilizando ideas de programación estocástica, otros métodos sugieren enfoques basados en simulación, tal como el enfoque propuesto en [3], donde se toman en cuenta las fluctuaciones de los tiempos de procesamiento, la fiabilidad/disponibilidad de equipos, el rendimiento de los procesos, las demandas y cambios de mano de obra, etc. Se utiliza, además, el muestreo de Monte Carlo para generar instancias aleatorias de los parámetros inciertos, se determina un schedule para cada instancia, y se genera una distribución de las propiedades agregadas para inferir las políticas que operan.

C. Método de optimización robusta La programación robusta se centra en la construcción de schedules preventivos para minimizar los efectos de las interrupciones en la medida del rendimiento y de esta manera, tratar de asegurar que el schedule de predicción y el schedule realizado no difieran drásticamente, mientras se mantiene un alto nivel de rendimiento.

En [22] se desarrolla el concepto de la optimización robusta (RO) para manejar la compensación asociada a la solución y robustez de los modelos. Una solución para un problema de optimización es considerada como robusta si se mantiene cercana a la solución óptima para todos los escenarios, y un modelo es robusto si sigue siendo viable para la mayoría de los escenarios. La idea básica de la optimización robusta es que, al reformular el problema original, o mediante la resolución de una secuencia de problemas, sea posible encontrar una solución robusta a la incertidumbre en los datos. Uno de los primeros trabajos sobre la optimización robusta, se encuentra en [35], donde se consideran perturbaciones simples en los datos dirigidos a encontrar una reformulación del problema original de tal manera que la solución resultante sea factible ante todas las perturbaciones posibles. Posteriormente, los trabajos pioneros hechos en [?, 4] y [10], ampliaron el marco de optimización robusta, e incluyeron técnicas de solución sofisticadas con conjuntos de incertidumbre no triviales para describir los datos. Las principales ventajas de la optimización robusta en comparación con la programación estocástica son la falta de necesidad de realizar suposiciones con respecto a la distribución de probabilidad subyacente de los datos inciertos y el hecho de proporcionar una manera para incorporar diferentes formas de actuar ante el riesgo. La optimización robusta se aplica en varias áreas de la investigación, tales como la planificación de producción [11, 25], scheduling de máquinas [9], Job Shop [39] y en logísticas [12] y [?].

D. Método de programación difusa Los enfoques presentados hasta ahora se basan en el uso de modelos probabilísticos que describen los parámetros inciertos en términos de distribuciones de probabilidad. Sin embargo, a veces esta información no está disponible. Para tales casos, un enfoque alternativo es el uso de la teoría de conjuntos difusos y de la aritmética de intervalos para describir la imprecisión y las incertidumbres en los parámetros del proceso.

En las últimas décadas, la teoría de conjuntos difusos se ha aplicado a la optimización de scheduling utilizando técnicas de búsqueda heurística. La diferencia principal entre el enfoque estocástico y el de optimización fuzzy es la forma en que se modela la incertidumbre. La programación difusa considera parámetros aleatorios como números borrosos y las restricciones son tratadas como conjuntos difusos. Se permite una cierta violación de restricciones y el grado de satisfacción de una restricción se define como la función de pertenencia de la restricción. Las funciones objetivo en la programación matemática borrosa son tratadas como restricciones y los límites inferior y superior de estas restricciones definen las expectativas de los decisores.

En [2] se aplica un enfoque no probabilístico para el tratamiento del tiempo de procesamiento con incertidumbre en dos problemas de programación: (i) Plantas de tipo flow-shop; (ii) procesamiento para desarrollar nuevos productos. Los ejemplos considerados muestran muy buenas estimaciones del makespan incierto y los ingresos pueden obtenerse mediante el uso de discretizaciones bastante amplias. Además, estos modelos pueden resolverse con poco esfuerzo computacional. En estos ejemplos, la mejora en la estimación del tiempo de finalización mediante el uso de una discretización más densa, no fue lo suficientemente significativa como para justificar el orden de incremento de magnitud en el tiempo de cálculo necesario. En [37] se desarrolló una metodología de programación robusta basada en la teoría de conjuntos difusos para proyectos de fabricación de productos, en un entorno incierto. Los parámetros temporales imprecisos involucrados en el proyecto fueron representados por conjuntos difusos. En [26] se hace un diseño de un sistema de ayuda a la decisión (SSD) para la programación de máquinas con la presencia de incertidumbre disruptiva utilizando conjuntos difusos.

E. Análisis sensitivo El análisis de sensibilidad (SA) se utiliza para determinar, en qué medida, la

salida de un modelo dado, depende de los parámetros de entrada. Este es un método importante para el control de la calidad de ese modelo, así como una herramienta poderosa para el control de la solidez y la confiabilidad de cualquier solución. Debido a la naturaleza combinatoria del problema de scheduling, el análisis de sensibilidad plantea algunos problemas únicos.

Pocos trabajos han aparecido en la literatura sobre el análisis de sensibilidad (SA) para problemas de scheduling. Una revisión de la literatura hecha en [13] señaló una serie de cuestiones relacionadas con la aplicación de este en problemas de programación que implican: la aplicabilidad del SA para ciertas clases de problemas de programación, y la selección de un schedule con la sensibilidad mínima.

En [34] se estudió el efecto de las perturbaciones en la solución óptima y se desarrollaron una serie de soluciones perturbadas que abarcan una región limitada específica del espacio de parámetros. Este trabajo intenta desvelar los parámetros más sensibles a las perturbaciones y aquellos que tienen mayor impacto en la solución. La interacción entre las limitaciones de recursos y la función objetivo se explora utilizando variaciones de los parámetros individuales.

En [15] se maneja la incertidumbre en scheduling a corto plazo basada en la idea de inferencia, base del análisis de sensibilidad para problemas MILP así como la utilización de una metodología de solución branch-and-bound. La idea básica del método propuesto es uso de la información obtenida a partir del análisis de sensibilidad de la solución determinista para determinar (a) la importancia de los diferentes parámetros y restricciones; (b) la gama de parámetros donde la solución óptima se mantenga sin cambios. Específicamente, el análisis propuesto consta de dos partes. En la primera parte, se extrae la información importante acerca de los efectos de diferentes parámetros luego de la etapa del análisis de sensibilidad, mientras que en la segunda parte, se determinan schedules alternativos y se evalúan éstos para diferentes rangos de incertidumbre.

F. Programación paramétrica La optimización paramétrica también sirve como una herramienta analítica en síntesis de procesos con incertidumbre, en el cual se mapean las incertidumbres en la definición de la síntesis del problema para el diseño óptimo de alternativas. Desde este punto de vista, es la solución matemática exacta del problema de incertidumbre.

En [36] se propuso un modelo de programación binaria para el problema de Job Shop Scheduling, con el objetivo de minimizar el makespan. El algoritmo consta de dos partes: (a) un algoritmo de programación lineal paramétrica, basada en el algoritmo branch and bound, para solucionar el problema de Job-shop con tiempo de finalización fija y (b) un algoritmo de expansión del problema para encontrar el momento óptimo de finalización. En [29], se abordó el problema en dos niveles de la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre, en el contexto optimizar optimización la cadena de suministro en toda la empresa. El primer nivel corresponde a un problema de planificación de planta, mientras que el otro a un problema de la red de distribución.

Para una mejor revisión de los trabajos realizados en estos enfoques ver [20, 21, 40].

3. Conclusiones.

- La incertidumbre es un tema importante a considerar en la teoría de scheduling por ser muy frecuente en la realidad.
- Existen diferentes formas de representar la incertidumbre. Esto se debe, principalmente a que no todas las variables inciertas son de la misma naturaleza, o no se tienen los datos necesarios.
- Existen diferentes métodos para solucionar los problemas de scheduling, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. También se pueden combinar dichos métodos para obtener soluciones más óptimas.
- Se muestran ejemplos de algunos sectores de la industria, donde se presenta la incertidumbre, así como la forma de representar la incertidumbre.

Agradecimiento. Este trabajo ha sido desarrollado dentro del marco del proyecto No.PIBA-2-P-069-14 financiado por INNOVATE PERÚ.

Referencias

- [1] Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K., Mohan, S., Uzsoy, R. *Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions*. European Journal of Operational Research, 161(1),(2005) pp. 86-110.
- [2] Balasubramanian, J., Grossmann, I. E. *Scheduling optimization under uncertainty-an alternative approach*. Computers and Chemical Engineering, 27(4),(2003) pp. 469-490.
- [3] Bassett, M. H., Pekny, J. F., Reklaitis, J. F. *Using detailed scheduling to obtain realistic operating policies for a batch processing facility*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 36(5), (1997) pp. 1717-1726.
- [4] Bertsimas, D., Sim, M. *Robust discrete optimization and network flows*. Mathematical Programming, 98,(2003) pp. 49-71.
- [5] Birewar, D. B., Grossmann, I. E. *Simultaneous production planning and scheduling in multiproduct batch plants*, Industrial and Engineering Chemistry Research, 29(4),(1990) pp. 570-580.

- [6] Bonfill, A.; Espuña, A.; Puigjaner, L. *Addressing robustness in scheduling batch processes with uncertain operation times*, Ind. Eng. Chem. Res. 44, (2005) pp. 1524-1534.
- [7] Bonfill, A., Bagajewicz, M., Espuña, A., Puigjaner, L. *Risk management in the scheduling of batch plants under uncertain market demand*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 43(3),(2004) pp. 741-750.
- [8] Churh, L., Uzsoy, R. *Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops*, International Computer Integrated Manufacturing, 5,(1992) pp. 153-163.
- [9] Daniels, R. L., Kouvelis, P. *ROBUST SCHEDULING TO HEDGE AGAINST PROCESSING TIME UNCERTAINTY IN SINGLE-STAGE PRODUCTION*, Management Science, 41, (1995) pp. 363-376.
- [10] El-Ghaoui, L., Oustry, F., Lebret, H. *Robust solutions to uncertain semidefinite programs*. SIAM Journal of Optimization, 9,(1998) pp. 33-52.
- [11] Escudero, L. F., Kamesan, P. V., King, A. J., Wets, R. J. *Production planning via scenario modeling*. Annals of Operations Research, 43, (1993) pp. 311-335.
- [12] Escudero, L., Quintana, F. J., Salmeron, J. *A modeling and an algorithmic framework for oil supply, transformation and distribution optimization under uncertainty*, European Journal of Operational Research, 114, (1999) pp. 638-656.
- [13] Hall, N. G., Posner, M.E. *Sensitivity analysis for scheduling problems*, Journal of Scheduling, 7(1),(2004) pp. 49-83.
- [14] Ierapetritou, M. G., Pistikopoulos, E. N. *Global optimization for stochastic planning, scheduling and design problems*, In I. E. Grossmann (Ed.), Global optimization in engineering design (1996) pp. 231-287.
- [15] Jia, Z., Ierapetritou, M. G. *Short-term scheduling under uncertainty using MILP sensitivity analysis*, Industrial and Engineering Chemistry Research, 43, (2004) pp. 3782-3791.
- [16] Karabuk, S., Sabuncuoglu, I. *Rescheduling frequency in an FMS with uncertain processing times and unreliable machines*, Research Report: IEOR-9704, 1997.
- [17] Kutanoglu, E. and Sabuncuoglu, I. *Experimental Investigation of Iterative Simulation-Based Scheduling in a Dynamic and Stochastic Job Shop*, Journal of Manufacturing Systems, 20,4, (2001) pp. 264-279.
- [18] Kondili E., Pantelides C.C., Sargent R.W.H. *A General Algorithm for Short-Term Scheduling of Batch Operations. I. MILP formulation*, Computers and Chemical Engineering, 17, (1993) pp. 211-227.
- [19] Lei D. *Multi-objective production scheduling: a survey*, Int J AdvManufTechnol, 43, (2009) pp. 926-938.
- [20] Li, Z.; Ierapetritou, M. G. *Integrated production planning and scheduling using a decomposition framework*, Chem. Eng. Sci., 64, (2009) pp. 3585-3597.
- [21] Li, Z.; Ierapetritou, M. G. *Process scheduling under uncertainty using multiparametric programming*, AIChE J., 53,(2007) 3183-3203.
- [22] Mulvey, J., Vanderbei, R., Zenios, S. A. *Robust optimization of large scale systems*, Operations Research, 43, (1995) pp. 264-281.
- [23] Orcun, S., Altinel, K., Hortacsu, O. *Scheduling of batch processes with operational uncertainties*, Computers and Chemical Engineering, 20, (1996) pp. S1191-S1196.
- [24] O'Donovan, R., Uzsoy, R. and McKay, K. N. *Predictable Scheduling of a Single Machine with Breakdowns and Sensitive Jobs*, Int. J. Prod. Res., 37,18,(1999) pp. 4217-4233.
- [25] Peter M. Verderame, Josephine A. Elia, Jie Li, and Christodoulos A. Floudas. *Planning and Scheduling under uncertainty: A review across multiple sectors*, Ind. Eng. Chem. 49, 9, (2010) pp. 3993-4017.
- [26] Petrovic, D.; Duenas, A. *A fuzzy logic based production scheduling/ rescheduling in the presence of uncertain disruptions*, Fuzzy Sets and System, 157,(2006) pp. 2273-2285.
- [27] Raman, N., Rachamadugu, R. V. and Talbot, B. *Real-time Scheduling of an Automated Manufacturing Center*, European Journal of Operations Research, 40,(1989) pag. 222-242.
- [28] Rodrigues, M. T. M., Gimeno, L., Passos, C. A. S., Campos, M. D. *Reactive scheduling approach for multipurpose chemical batch plants*, Computers and Chemical Engineering, 20,(1996) pp. S1215-S1220.
- [29] Ryu, J., Dua, V., Pistikopoulos, E. N. *Proactive scheduling under uncertainty: A parametric optimization approach*, Ind. Eng. Chem. Res., 46,(2007) pp. 8044-8049.
- [30] Ryu J., Pistikopoulos, E. N. *Solving scheduling problems under uncertainty using parametric programming*, In Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems; Jeju Island, Korea, June 2001; Stephanopoulos, G., Lee, J. H., Yoon, E. S., Eds.; (2002) pp. 225-230.
- [31] Sabuncuoglu, I. Bayiz, M. *Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment*, Research Report: IEOR-9826,1998.
- [32] Sabuncuoglu, I. and Karabuk, S. *Rescheduling Frequency in an FMS with Uncertain Processing Times and Unreliable Machines*, Journal of Manufacturing Systems, 18,4,(1999) pp. 1-16
- [33] Sabuncuoglu I., Goren S. *Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 22, 2 (2009) pp. 138-157.
- [34] Samikoglu, O., Honkomp, S. J., Pekny, J. F.,Reklaitis,G.V. *Sensitivity analysis for project planning and scheduling under uncertain completions*, Computers and Chemical Engineering, 22,(1998) pp. S871-S874.
- [35] Soyster, A. L. *Convex programming with set inclusive constraints and applications to inexact linear programming*, Operations Research, 21,(1973) pp. 1154-1157.
- [36] Thompson, G. L., Zawack, D. J. *A problem expanding parametric programming method for solving the job shop scheduling problem*, Annals of Operations Research, 4(1),(1985) pp. 327-342.
- [37] Wang, J. *A fuzzy robust scheduling approach for product development projects*, European Journal of Operational Research, 152(1),(2004) pp. 180-194.
- [38] Wu, S. D., Storer, R. N. and Chang P. *One-Machine Rescheduling Heuristics with Efficiency and Stability as Criteria*, Computers Ops Res., 20, 1, (1993) pp. 1-14.
- [39] Wu, S. D., Byeon, E. and Storer, R. H. *A Graph-Theoretic Decomposition of the Job Shop Scheduling Problem to Achieve Scheduling Robustness*, Operations Research, 47, 1,(1999) pp. 113-124.
- [40] Zukui Li, Marianthi Ierapetritou. *Process Scheduling Under Uncertainty: review and challenges*, Computers and Chemical Engineering 32, (2007) pp. 715-727.